УДК 539.63: 537.311.3
DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-1-101-108

Электросопротивление алюминия при ударном сжатии

С. Д. Гилев, В. С. Прокопьев

*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН
Новосибирск, Россия*

Аннотация

При помощи электроконтактного метода выполнены измерения электросопротивления алюминиевой фольги при ударном сжатии. Получены зависимости электросопротивления R и удельного электросопротивления ρ от давления ударной волны p в диапазоне давлений до 22 ГПа. Найденная зависимость $R(p)$ является монотонно возрастающей гладкой функцией давления. Зависимость $\rho(p)$ имеет более сложный характер: при росте давления удельное электросопротивление сначала уменьшается, а далее увеличивается.

Ключевые слова

электросопротивление, удельное электросопротивление, алюминий, ударное сжатие, высокие давления и температуры

Для цитирования

Гилев С. Д., Прокопьев В. С. Электросопротивление алюминия при ударном сжатии // Сибирский физический журнал. 2021. Т. 16, № 1. С. 101–108. DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-1-101-108

Electrical Resistivity of Aluminum under Shock Compression

S. D. Gilev, V. S. Prokopiev

*Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

Abstract

Electrical resistance measurements of aluminum foil are conducted under shock compression using the electric contact technique. Shock wave pressure p dependences of the electrical resistance R and the resistivity ρ are obtained for pressure range up to 22 GPa. The found dependence $R(p)$ is a monotonically increasing smooth function of the pressure. The dependence $\rho(p)$ is more complex: with increasing pressure, the electrical resistivity first decreases and then increases.

Keywords

electrical resistance, resistivity, aluminum, shock compression, high pressure and temperatures

For citation

Gilev S. D., Prokopiev V. S. Electrical Resistivity of Aluminum under Shock Compression. *Siberian Journal of Physics*, 2021, vol. 16, no. 1, p. 101–108. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-1-101-108

Введение

Алюминий является одним из эталонных материалов в различных областях физики, в том числе физики ударных волн и высоких плотностей энергии. Механические и теплофизические свойства алюминия в области высоких давлений и температур исследованы достаточно подробно, в то же время электрофизические характеристики металла в этих условиях известны с большей степенью неопределенности. Информация об электросопротивлении дает ключ

к пониманию физического состояния вещества и необходима для разработки ряда электрофизических устройств, в том числе магнитокумулятивных генераторов, электромагнитных пушек, коммутирующих элементов сильноточных импульсных цепей. Для решения этих задач необходимы достоверные экспериментальные данные об электросопротивлении. В настоящее время известно несколько работ, посвященных исследованию электросопротивления и удельного электросопротивления алюминия при сильном сжатии.

В исторических опытах Бриджмена по гидростатическому сжатию получена зависимость относительного электросопротивления алюминия от давления в диапазоне до 10 ГПа при комнатной температуре [1]. В дальнейшем в связи с ревизией шкалы давлений верхняя граница давления была уменьшена до 7 ГПа [2]. Согласно [1; 2], при росте давления электросопротивление алюминия монотонно уменьшается. В расчетах [3] предсказан более сложный, немонотонный характер изменения электросопротивления. Согласно [3], сначала электросопротивление уменьшается, достигая минимума при давлении около 25 ГПа, и увеличивается при дальнейшем росте давления. Такое поведение объяснено деформацией поверхности Ферми при сжатии металла. Экспериментальное подтверждение этого эффекта к настоящему времени отсутствует.

Результаты измерений электросопротивления алюминия при ударном сжатии немногочисленны и достаточно противоречивы. В [4] поставлены эксперименты по измерению электросопротивления алюминиевой фольги, размещенной между слоями оргстекла. При увеличении давления ударной волны p электросопротивление R монотонно росло. Найденная зависимость $R(p)$ имела излом при давлении около 10 ГПа. При помощи бесконтактного электромагнитного метода в [5] найдена электропроводность ударно-сжатой фольги, помещенной в оргстекло. Для образцов разной толщины электропроводность оказалась различной. При давлении ударной волны 18,5 ГПа электропроводность уменьшилась по сравнению с начальным значением в 2,1 раза для образцов толщиной 30 и 50 мкм и в 6 раз для толщины 10 мкм. Такая разница свидетельствует, по-видимому, о методических проблемах измерений для тонких образцов.

В [6] бесконтактным электромагнитным методом найдено электросопротивление алюминиевой фольги, помещенной во фторопласт, при давлении ударной волны до 14 ГПа. Результаты [4] и [6] качественно согласуются до давления $p \approx 10$ ГПа. При большем давлении зависимость $R(p)$ в [6] отклоняется вниз относительно [4]. Автор [6] объяснил такое различие возможным влиянием неконтролируемых деформаций элементов измерительной системы при использовании контактного метода в [4]. Поскольку описание системы нагружения и измерительной ячейки в [4] не приведено, то трудно сделать вывод о степени обоснованности такого предположения. Отличие между данными [4] и [6] может быть связано с ударным нагревом образца. Вследствие реверберации волн сжатия и разрежения нагрев тонкой фольги зависит от соотношения ударных импедансов металла и окружающего его диэлектрика.

Имеющаяся экспериментальная информация разных авторов [4–6] значительно расходится количественно и не позволяет сделать определенного вывода о поведении электросопротивления, кроме общего утверждения, что электросопротивление алюминия растет при увеличении давления ударной волны.

Цель настоящей работы состояла в получении количественных экспериментальных данных об электросопротивлении алюминия при ударном сжатии в области давления до 22 ГПа.

Метод измерений и результаты экспериментов

Для измерения электросопротивления тонких металлических образцов использовалась четырехточечная схема, которая работала в режиме постоянного тока [7]. Образец (рис. 1, а) вырезался из цельного куска фольги и размещался между пластинами диэлектрика (фторопласта-4) (рис. 1, б). Для ударного нагружения использовались заряды взрывчатых веществ, которые располагались непосредственно на измерительной ячейке. В измерительной ячейке генерировалась плоская ударная волна, в которой образец испытывал одномерное сжатие.

Рис. 1. Постановка измерений: *a* – фольговый образец; *б* – сечение измерительной ячейки. Стрелки показывают область на границе ячейки, подвергнутой ударному нагружению (*1* – образец, *2* – диэлектрик, *3* – электроды, ориентированы перпендикулярно плоскости второго рисунка)

Fig. 1. Setting up measurements: foil sample (*a*) and cross section of the measuring cell (*b*). The arrows show the area at the cell boundary that is subjected to shock loading (*1* is a sample; *2* is a dielectric; *3* are leads oriented perpendicular to the plane of the second figure)

В экспериментах использовалась алюминиевая фольга толщиной 15 мкм. Для устранения воздушных зазоров фольга клеивалась между диэлектрическими пластинами при помощи эпоксидного компаунда. Поскольку толщина фольги намного меньше, чем толщина окружающего диэлектрика (≈ 5 мм), то установившееся в алюминии давление отождествлялось с давлением падающей ударной волны в диэлектрике. В остальном постановка экспериментов соответствует [8].

На рис. 2 показана характерная экспериментальная запись напряжения с электродов. Под воздействием ударной волны напряжение на электродах резко возрастает и далее изменяется лишь слабо. Схема работала в режиме постоянного тока, так что регистрируемое напряжение V пропорционально электрическому сопротивлению R . Как и в [8], для определения сопротивления использовалось два уровня напряжения: начальный уровень (до воздействия ударной волны) и точка, соответствующая изменению наклона напряжения от резкого роста к плавному изменению.

Результаты экспериментов представлены на рис. 3 в виде зависимости относительного электросопротивления алюминия от давления ударной волны. Указанные на рис. 3 погрешности экспериментальных данных связаны с измерением напряжения цифровым осциллографом при нахождении электросопротивления (около 3 %) и расчетом давления ударной волны (около 5 %).

Кроме наших результатов на рис. 3 показаны данные [1; 2; 4; 6]. Из рисунка видно, что при ударном сжатии электросопротивление алюминия монотонно увеличивается при росте

давления. Такой характер зависимости качественно отличается от поведения электросопротивления при статическом сжатии, где наблюдалось уменьшение электросопротивления [1].

Рис. 2. Запись напряжения в опыте по измерению электросопротивления алюминия при ударном сжатии. Давление ударной волны в диэлектрике $p = 22,4$ ГПа

Fig. 2. Voltage record in experiments on measuring the electrical resistance of aluminum under shock compression. The shock wave pressure in the dielectric is $p = 22.4$ GPa

Рис. 3. Зависимость относительного электросопротивления алюминия от давления ударной волны: 1 – наши данные; 2 – аппроксимация данных полиномиальной зависимостью. Результаты других авторов: 3 – [4]; 4 – [6]; 5 – [1]; 6 – [2]

Fig. 3. Dependence of the normalized electrical resistance of aluminum on the pressure of the shock wave: 1 is our data; 2 is approximation of the data by a polynomial. Results of other authors: 3 – [4]; 4 – [6]; 5 – [1]; 6 – [2]

Наши результаты согласуются с известными ударно-волновыми данными [4; 6] лишь качественно. Главное отличие полученных данных состоит в том, что зарегистрированы меньшие значения относительного сопротивления, чем в [4; 6]. Отличие по сравнению [4] может быть объяснено различием материала обложки (оргстекло в [4], фторопласт в наших опытах). При размещении алюминиевой фольги в оргстекло температура образца при ударном сжатии больше, чем для фторопласта (при том же давлении падающей ударной волны в диэлектрике).

Причиной расхождения наших данных с [6], возможно, являются недостатки электромагнитной методики [6]. Бесконтактная техника измерений [6] достаточно сложна. Она не позволяет регистрировать динамику изменения электросопротивления и дает данные, которые имеют худшую точность, чем использованный нами электроконтактный метод. Данные в [6] описаны линейной зависимостью электросопротивления от давления $R(p)$. Наши данные могут быть описаны более сложной, квадратичной зависимостью

$$R/R_0 = 1 + 0,01p + 9,7 \cdot 10^{-4} p^2$$

(давление p выражено в ГПа). Расхождения в первичных данных между нашей работой и [6] (1 и 4 на рис. 3) визуально невелики, но приводят к качественным отличиям, когда по ним находится удельное электросопротивление.

По приведенным выше экспериментальным данным находилось удельное электросопротивление образца ρ . Для этого использовалось соотношение

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{R}{R_0} \frac{\delta}{\delta_0}, \quad (1)$$

справедливое для одномерного сжатия. В (1) ρ_0 – начальное удельное электросопротивление, δ/δ_0 – отношение толщины образца (сжатой и начальной). Для определения величины δ/δ_0 использовалась ударная адиабата алюминия [9]. (Различием в плотности вещества, определяемой по ударной адиабате однократного сжатия и при учете реверберации ударных волн в тонком металлическом образце, помещенном в материал с другим ударным импедансом, пренебрегали.)

Найденная таким образом зависимость относительного удельного электросопротивления алюминия от давления ударной волны показана на рис. 4 вместе с данными, описывающими гидростатическое сжатие при комнатной температуре. Экспериментальные данные по сопротивлению из [2] пересчитаны к удельному сопротивлению с помощью изотермы при комнатной температуре [10]. Здесь же показана одна из зависимостей удельного сопротивления от давления, полученная теоретически в [3].

Анализ рис. 4 приводит к заключению, что зависимость удельного электросопротивления от давления ударной волны не является монотонно возрастающей функцией, как можно было бы предположить исходя из данных по электросопротивлению на рис. 3. Внимательное изучение аппроксимирующей кривой показывает, что при малых давлениях удельное электросопротивление немного уменьшается. Такой сложный характер зависимости $\rho(p)$ для металла, не испытывающего фазовый переход, экспериментально обнаружен впервые.

Дадим качественную интерпретацию поведения удельного электросопротивления при увеличении давления, которую демонстрирует рис. 4. Согласно модели Блоха – Грюнрайза [11], удельное электросопротивление металла зависит от удельного объема и температуры. В опытах по гидростатическому сжатию, проводимых при изотермических условиях, происходит изменение лишь удельного объема вещества. При сжатии уменьшается сечение проводника и увеличивается концентрация свободных электронов, что приводит к уменьшению удельного электросопротивления металла по мере роста давления. Зависимость электро-

сопротивления в виде монотонно уменьшающейся функции давления, подобная показанной на рис. 3 для алюминия, отмечалась для многих металлов [1].

Рис. 4. Зависимость относительного удельного электросопротивления алюминия от давления: 1 – наши данные при ударном сжатии; 2 – аппроксимация данных полиномиальной зависимостью. Гидростатическое сжатие при комнатной температуре: 3 – построено по экспериментальным данным [2]; 4 – расчетная зависимость [3]

Fig. 4. Dependence of the normalized electrical resistivity of aluminum on the pressure: 1 is our data for shock compression; 2 is approximation of the data by a polynomial. Hydrostatic compression at room temperature: line 3 is plotted for experimental data [2]; 4 is simulated dependence [3]

При ударном сжатии картина более сложная, поскольку одновременно изменяются как удельный объем, так и температура образца. Нагрев образца в условиях адиабатического сжатия приводит к увеличению удельного электросопротивления. Таким образом, при ударном сжатии изменение удельного объема и температуры влияет на величину удельного электросопротивления разнонаправленно. По этой причине на зависимости удельного электросопротивления металла от давления возможно появление минимума. Этот минимум связан с конкуренцией двух эффектов (сжатия и нагрева). Изменение температуры образца в исследованном диапазоне интенсивности ударной волны относительно невелико (до нескольких сотен градусов), так что общее поведение удельного электросопротивления, по-видимому, качественно может быть описано моделью Блоха – Грюнайзена. При больших давлениях ударной волны влияние температурного нагрева будет определяющим.

Заключение

Получены экспериментальные данные о зависимости электросопротивления и удельного электросопротивления алюминия от давления при ударном сжатии. Исследованный диапазон давлений расширен до 22 ГПа. Полученные данные могут быть использованы для обоснования модели электросопротивления металлов при ударном сжатии.

Список литературы

1. **Bridgman P. W.** The Resistance of 72 Elements, Alloys and Compounds to 100,000 Kg/Cm². *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 1952, vol. 81, no. 4, p. 165–251.
2. **Bundy F. P., Strong H. M.** Behavior of Metals at High Temperatures and Pressures. *Solid State Phys.*, 1962, vol. 13, p. 81–146.
3. **Cheung J., Ashcroft N. W.** Aluminum under high pressure. II. Resistivity. *Physical Review B.*, 1979, vol. 20, no. 8, p. 2991–2998.
4. **Гончаров А. И., Родионов В. Н.** Электросопротивление меди и алюминия при ударно-волновых нагружениях // II Всесоюз. конф. «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике»: Тез. докл. Киев, 1985. С. 72–73.
5. **Жугин Ю. Н., Левакова Ю. Л.** Влияние электропроводности и толщины проводящей пластины на регистрируемый сигнал индукционного датчика массовой скорости // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 6. С. 199–209.
6. **Гулевич М. А., Пай В. В., Яковлев И. В.** Метод определения электрической проводимости немагнитных металлов при динамическом нагружении // ФГВ. 2010. № 2. С. 121–127.
7. **Гилев С. Д.** Измерение электропроводности конденсированного вещества в ударных волнах (обзор) // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47, № 4. С. 3–23.
8. **Гилев С. Д., Прокопьев В. С.** Электросопротивление меди при ударном сжатии: экспериментальные данные // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52, № 1. С. 121–130.
9. **Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклотов М. В., Симаков Г. В.** Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / РФЯЦ ВНИИЭФ. 2-е изд. Саров, 2006.
10. **Syassen K., Holzapfel W. B.** Isothermal compression of Al and Ag to 120 kbar. *J. Appl. Phys.*, 1978, vol. 49, p. 4427–4430.
11. **Займан Дж.** Электроны и фононы. Теория явлений переноса в твердых телах: Пер. с англ. М.: Иностран. лит., 1962.

References

1. **Bridgman P. W.** The Resistance of 72 Elements, Alloys and Compounds to 100,000 Kg/Cm². *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 1952, vol. 81, no. 4, p. 165–251.
2. **Bundy F. P., Strong H. M.** Behavior of Metals at High Temperatures and Pressures. *Solid State Phys.*, 1962, vol. 13, p. 81–146.
3. **Cheung J., Ashcroft N. W.** Aluminum under high pressure. II. Resistivity. *Physical Review B.*, 1979, vol. 20, no. 8, p. 2991–2998.
4. **Goncharov A. I., Rodionov V. N.** Electrical Resistance of Copper and Aluminum under Shock Wave Loading. In: Lavrentiev Readings in Mathematics, Mechanics, and Physics, Proc. II All-Union Conf., Book of Abstracts. Kiev, 1985, p. 72–73. (in Russ.)
5. **Zhugin Yu. N., Levakova Yu. L.** Effect of the Conductance and Thickness of a Conducting Plate on the Signal from a Material-Velocity Inductive Transducer. *Prikl. Mekh. Tekh. Fiz.*, 2000, vol. 41, no. 6, p. 199–209. (in Russ.) [*J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2000, vol. 41, no. 6, p. 1136–1149. (in Eng.)]
6. **Gulevich M. A., Pai V. V., Yakovlev I. V.** Method for determining the electrical conductivity of nonmagnetic metals under dynamic loading. *Fiz. Goreniya i Vzryva*, 2010, vol. 46, no. 2, p. 121–127. (in Russ.) [*Combust., Expl., Shock Waves*, 2010, vol. 46, no. 2, p. 225–230. (in Eng.)]
7. **Gilev S. D.** Measurement of Electrical Conductivity of Condensed Substances in Shock Waves (Review). *Fiz. Goreniya i Vzryva*, 2011, vol. 47, no. 4, p. 2–237. (in Russ.) [*Combust., Expl., Shock Waves*, 2011, vol. 47, no. 4, p. 375–393. (in Eng.)]

8. **Gilev S. D., Prokopiev V. S.** Electrical Resistance of Copper under Shock Compression: Experimental Data. *Fiz. Goreniya i Vzryva*, 2016, vol. 52, no. 1, p. 121–130. (in Russ.) [*Combust., Expl., Shock Waves*, 2016, vol. 52, no. 1, p. 107–116. (in Eng.)]
9. **Trunin R. F., Gudarenko L. F., Zhernokletov M. V., Simakov G. V.** Experimental Data on Shock Wave Compression and Adiabatic Expansion of Condensed Matter. Inst. Exp. Phys. Russian Federal Nuclear Center, Sarov, 2006. (in Russ.)
10. **Syassen K., Holzapfel W. B.** Isothermal compression of Al and Ag to 120 kbar. *J. Appl. Phys.*, 1978, vol. 49, p. 4427–4430.
11. **Ziman J. M.** *Electrons and Phonons: The Theory of Transport Phenomena in Solids*. Oxford, Clarendon, 1960.

Материал поступил в редколлегию

Received

14.12.2020

Сведения об авторах / Information about the Authors

Гилев Сергей Данилович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск, Россия)

Sergey D. Gilev, Doctor of Science, Leading Researcher, Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

gilev@hydro.nsc.ru

Прокопьев Владимир Сергеевич, младший научный сотрудник, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск, Россия)

Vladimir S. Prokopiev, Junior Researcher, Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

prokopiev@hydro.nsc.ru